重离子辐照 CMOS 图像传感器导致的永久损伤效应

施昌松[1]，文 林[1,2]，郭 旗[1,2,]，李豫东[1,2]，姜 益[1,2]
（1. 中国科学院 新疆理化技术研究所 固体辐射物理研究室，新疆 乌鲁木齐 830011；2. 新疆大学，新疆 乌鲁木齐 830011）

摘要：互补型金属氧化物半导体（Complementary Metal Oxide Semiconductor, CMOS）图像传感器有着体积小，质量轻，功耗低，高集成度等特点正逐步取代 CCD 图像传感器，在空间辐射环境中有着质子，重粒子，γ射线，电子等大量的高能粒子，CMOS 图像传感器会受到重离子的辐射效应并对其有着永久损伤的影响。本文主要是针对 CMV4000 在重离子辐照下的永久损伤机制。CMV4000 在经过重离子辐照过后其图像有着明显的热像素（暗电流尖峰高于其他像素暗电流尖峰数倍通常表现为该像素的灰度值是其他正常像素的数倍），在下一帧图像以及后续图像中热像素也并不会消失，因此热像素并不是暂时的。本文还将考虑 CMOS 图像传感器在辐照前后各像参数的对比并揭示各项参数的退化机理。

关键词：CMOS 图像传感器 热像素 暗电流 永久损伤

中图分类号：TL48 **文章标志码：**A **文章编号：**0258-0918（2020）

Permanent damage effects of CMOS image sensor caused by heavy ions irradiation

LIU Jianfeng[1]，WANG Bin[2]， WANG Yueying[1,2]
（1. 单位英文名称, Shenzhen of Guangdong Prov. 518026, China;
2. 单位英文名称, Beijing 100084, China）

Abstract: Complementary Metal Oxide Semiconductor (CMOS) image sensor is gradually replacing CCD image sensor with small size, light weight, low power consumption, high integration and other characteristics. In the space radiation environment, it has protons, heavy particles, gamma rays, A large number of high-energy particles such as electrons, CMOS image sensors will be subject to the radiation effect of heavy ions and have permanent damage to them.This paper focuses on the mechanism of permanent damage of CMV4000 under heavy ion irradiation. CMV4000 images after heavy ion irradiation have obvious hot pixels (the dark current peak is several times higher than the dark current peak of other pixels usually shows that the gray value of the pixel is several times higher than that of other normal pixels), and the hot pixels will not disappear in the next frame image and subsequent images, so the hot pixels are not temporary.This paper also considers the comparison of image parameters of CMOS image sensor before and after irradiation and reveals the degradation mechanism of each parameter.

Key words: CMOS image sensor; hot pixels; Dark currents; Permanent damage

收稿日期：2020-08-17

基金项目：国家自然科学基金 XXXXX 研究（20200000）

作者简介：施昌松(1996—)，男，汉族，湖北省荆州市，学生，硕士，现从事光电器件辐射效应方面研究

通讯作者：施昌松，1085547396@qq.com

1 引言

近些年来随着半导体工艺的不断发展，CMOS 图像传感器的制造工艺也迎来了快速的发展。目前 CMOS 图像传感器在灵敏度，光谱响应，分辨率以及动态范围等领域上已经超越了 CCD（电耦合器件），并也随之不断取代 CCD 图像传感器。在空间环境中 CMOS 图像传感器因为其具有可靠性高，集成度高以及功耗低等特点已在空间环境中得到广泛应用，同时在空间环境中 CMOS 图像传感器主要用于拍摄星空图像的相机，太阳敏感器，对地遥感等多领域有着广泛的应用。

空间中有重离子、质子、电子等高能粒子，重离子主要导致单粒子效应，质子、电子主要导致电离总剂量、位移损伤效应。

已有研究 CMOS 图像传感器电离总剂量、位移损伤效应的文献报道，对敏感参数、损伤机理有较深入的研究[1]。CMOS 图像传感器重离子单粒子效应研究也有报道。重离子导致的永久损伤没有报道。随着我国发展深空探测，以重离子为主的银河宇宙射线辐射变得更加重要，重离子辐射导致的永久损伤不可忽视，特别是高灵敏度 CMOS 图像传感器，在辐射累积剂量非常低时即表现出显著的像素退化。国外关于 CMOS 图像传感器重离子辐照很早就有开始报道，2014 年 Beaumel 等人对抗辐射型 CMOS 图像传感器进行了重离子的辐射试验，当 LET 值高达 67.8MeV • mg/cm^2时发现了 SEU（单粒子翻转）图像异常现象，并给出了一系列异常图像，通过异常图像定位了外围电路受损部位[2]。2013 年 Lalucaa 等人对 4T 商用 CMOS 图像传感器进行了重离子辐照试验，发现了两种 SEL 现象，并分析了这两种异常是由行，列译码器的电平转换电路发生闩锁导致，并通过研究发现，CMOS 图像传感器发生 SEL 的阈值时在 15.9-40.4MeV/cm^2之间[3]。2019 年汪波等人对 CMOS 图像传感器进行了重离子诱导 SEU 的研究报道了单粒子翻转的规律和现象。2020 年新疆理化所的蔡毓龙对商业 CMOS 图像传感器中的 SET 和 SEL 效应，包括重离子测试，脉冲激光测绘实验和空间中进行了 SEL 速率预测。2013 年 Emma Martin 等人通过 30MeV-185 MeV 质子对 COT CMOS 图像传感器进行辐照实验，模拟了空间辐射环境诱导的 CMOS 图像传感器的暗点流增加以及分布[13]。新疆理化所文林等对 CMOS 图像传感器进行了质子，中子，重离子等的辐照研究，并对 3T 4T 5T 8T 等结构的像素 CMOS 图像传感器开展了位移损伤，总剂量，单粒子效应的研究，并获取了各项参数的退化以及揭示了器损伤机理，同样也对 CMOS 图像传感器重离子永久损伤机理提供了宝贵的经验[8]。

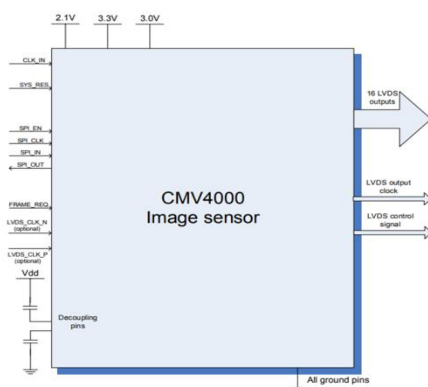
本文针对重离子辐射导致的 CMOS 图像传感器永久损伤，首次通过辐照、退火系统地研究重离子永久损伤导致的敏感参数退化规律和机理。首先，通过计算获得重离子辐照产生的电离、位移损伤剂量，然后结合参数退化和退火阶段的恢复情况，分析重离子辐射敏感参数和变化规律，最后，系统地给出了重离子永久损伤的敏感参数和电离、位移缺陷作用机制。

本文研究揭示重离子永久损伤的规律和机理，为全面评估重离子导致的 CMOS 图像传感器性能退化提供理论依据和基础数据，为我国深空探测高灵敏度 CMOS 图像传感器抗辐射评估和性能预测提供支撑。

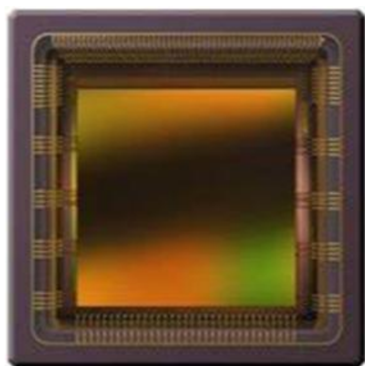
2 实验细节

本次试验所选择的样品为 CMOSIS 公司生产的工业级 CMOS 图像传（CMV4000ES）,该款

器件是可见光面阵图像传感器，该款器件包括像素区域（2048×2048，单个像素为 5.5μm×5.5μm），时序电路，AFE 电路以及 LVDS 电路等，该款器件采用的是帧转换的读出方式，器件结构如图 1 所示。



（a）



（b）

图 1　cmv4000 图像传感器结构

Fig.1　The steucture of the cmv4000 image sensor

其中内部像素单元如下图所示，该像素采用的是 4T 结构其中包括源跟随器（Source follower，SF），钳位光电二级管 (pinned photodiode, PPD)，浮动扩散装置（floating diffusion，FD），传输门结构（transfer gate，TG）。本次试验样品为国产 0.18μm 工业级 CMOS 图像传感器，样品由 2048×2048 个像素组成。

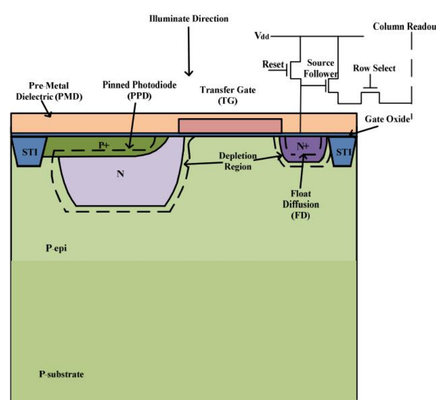


图 2 4T 像素单元图

Fig.2 A plot of 4T piexl cells

辐照实验在北京的中国原子能研究院串列静电加速器，该设备可以提供较宽能量谱本次试验采用的粒子束能量为 208MeV·mg/cm²，图像传感器的辐照区域选取为中间部分，并用铅条将外围电路以及除中间辐照区域以外的像素区域屏蔽掉，这样可以形成辐照区域与非辐照区域的对照关系。该试验注量率为 1.72×10^{4}ions/cm² 累积注量达到 1×10^{7}ions/cm²，采用的粒子束 Ge 离子 LET 值 37.3MeV·mg·cm²，辐照时将罐子里的空气抽为真空来减少重离子的能量损失，试验期间盖上真空罐从而形成暗场条件，辐照完成后将采用离线测试并在暗场条件下完成图像的采集以及测试数据分析，试验现场图如（图 3）所示。

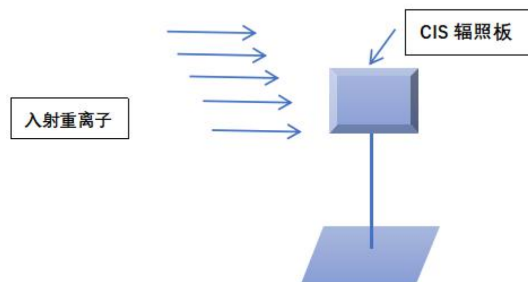


图 3　辐照现场图

Fig.3 Irradiation site map

3　重离子引发的永久损伤

3.1　参数分析逻辑

本试验主由暗场，光响应，光谱特性三部分构成，重离子辐照产生的电离、位移损伤的能量沉积如

下（表 1）所示，通过电离和位移剂量给出了 CMOS 图像传感器各参数在辐照后的电离和位移的敏感特性情况如下（表 2）所示

表 1

粒子	LET	注量	电离剂量	NIEL	DDD
Ge	37.3MeV·mg·cm²	1E7	6.333rad	20.4	2.040E+8 MeV/g

表 2

序号	参数类型	参数	电离敏感	位移敏感	备注
1	增益	转换增益	●		可能都敏感
2	暗场	暗电流	●	●	
3		读出噪声	●		可能都敏感
4		DSNU	●	●	
5		热像素		●	
6	光响应参数	满阱容量	●		
7		动态范围	●	●	
8		信噪比	●	●	
9		PRNU	●		
10	光谱特性	光谱响应	●	●	

3.2 各参数退化机理

3.2.1 暗电流

暗电流是暗场下的平均灰度值以及所对应的积分时间的变化趋势，如（图 4）所示为暗电流在 1-21 天的退火时间以及暗电流在该时间段的上升的趋势，在 21-31 天内暗电流有比较明显的下降趋势，在随后的退火时间内呈现缓慢的上升趋势总体情况来看其变化趋势趋于稳定水平几乎达到辐照前的水平。在 1-21 天以及 31 天后暗电流上升情况推测是由于在测试过程中环境温度的变化导致，暗电流的升高与环境温度有着较大的关系[4-5]。根据表 1 可知高能重离子对 CMOS 图像传感器主要导致位移损伤效应以及少量的电离总剂量效应。当重离子入射 CMOS 图像传感器时在其径迹上累积 DDD（位移总剂量），粒子与器件内部的晶格原子发生碰撞并使其原来位子的原子发生位移，这些原子还可以和器件内部其它杂质原子结合并行成其它的缺陷类型，本次试验所使用的重离子束能量较高，较高的重离子能量同样 PKA（初级反冲原子）也具有较高的能量，位移损伤效应会使破坏器件内晶体原子序列，从而引入缺陷能级使得价带电子先跃迁到缺陷能级然后从缺陷能级跃迁到导带的过程，当在载流子以扩散的方式运动到耗尽区被吸收形成了暗电流。

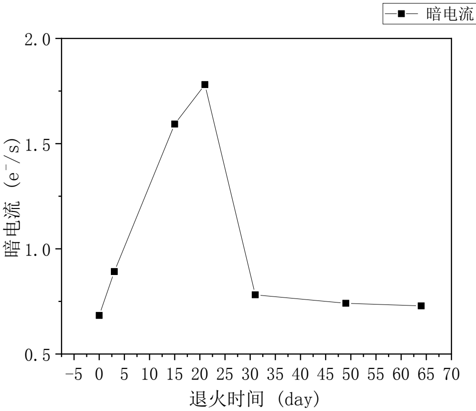


图 4　暗电流

Fig.4 Dark current

3.2.2 暗场不均一性

暗场不均一性（DSNU)表示在 CMOS 图像传感器中暗场条件下各像素响应不均一性，DSNU 是由暗场下标准差与转换增益的比值来定义即 $DSNU=\frac{S_{Ydark}}{K}$。(如图 5)所示 DSNU 在辐照后有明显的上升，经过室温退后有了明显的恢复。暗电流对 DSNU 有比较大的影响，幅照后暗电流的升高导致热像素的产生，（如图 6）所示为辐照前后的像素图对比,图 a 为辐照前图 b 为辐照后，两幅图都是在暗场条件下采集的图片，左边为辐照前像素图，右图为辐照后的像素图，可以看出辐照后图中的热像素明显增多。（如图 4）

为辐照前后热像素灰度折线图像素在暗场条件下灰度值集中在 50-85 之间，辐照后有不少像素灰度值高出正常像素的灰度值的数倍，正常图像的灰度值大概在 70，灰度值高于 150 可定义为热像素[6-7]，如右图所示灰度值高于 150 大约有 5226 个，这些热像素的产生正是导致了 DSNU 上升的重要原因。另外辐照后暗场下的标准差的增大以及转换增益的减小同时导致 DSNU 的增大。室温退火后热像素有了明显的恢复同时也导致了 DSNU 的恢复。

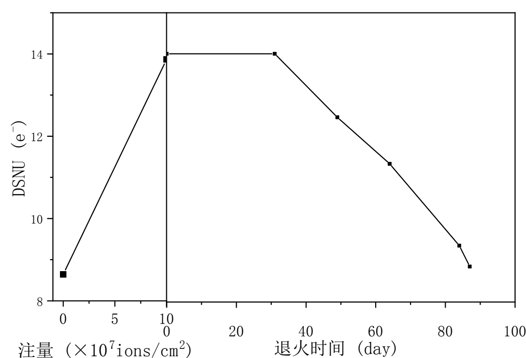


图 5　DSNU

Fig.6 DSNU



（a）



（b）

图 6　辐照前后像素对比图

Fig.6 Comparison of pixels before and after irradiation

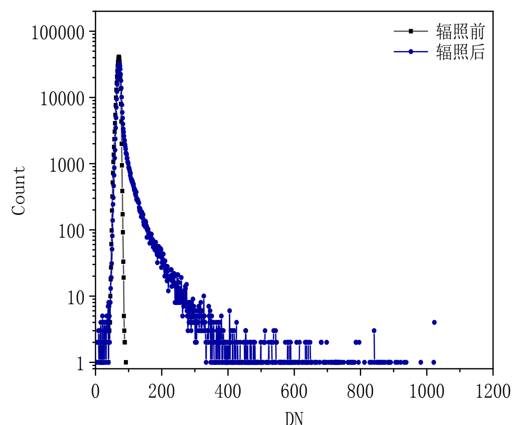


图 7　辐照前后灰度折线图

Fig.7 Gray line graph before and after irradiation

重离子辐照的特点是其射程距离较短，对于 SI 基材料而言重离子主要是通过位移损伤以及电离损伤方式引起的一系列辐射效应。图像均为暗场条件下采集的图像，图像中由多个大小不一的热像素，且热像素的所占的像素各也各有不同，且在下一帧以及下下帧的图像中这些热像素也并没有消失，因此可以说明本次试验所导致的热像素并不是暂时的，热像素在每一帧图像中的位置并不会发生改变，重离子导致的缺陷分布如（图 8）所示缺陷由黑点标出，由于重离子对 CMOS 图像传感器会产生位移以及电离损伤，由位移损伤产生的缺陷主要集中在空间电荷区，由电离损伤产生的缺陷主要集中在 Si-SiO_2 界面区以及 PPD 空间电荷区附近的 STI 结构表面的缺陷[7-8]。

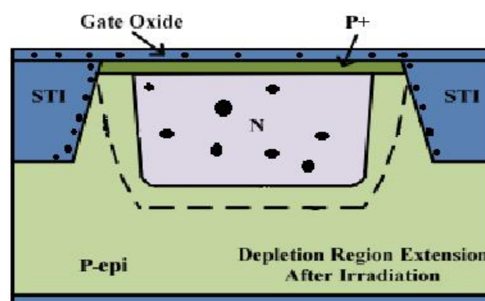


图 8　缺陷分布图

Fig.8 Defect profile

3.3　光响应参数

本次试验主要是记录辐照完退火过程中的一些参数的变化，由于其它因素所只选择了退火时间在辐照完后以及第 3，15，21 天测试了暗场下的参数，分别在第 31，49，64，84，87 天测试了暗场和光场下的参数。信噪比对 CMOS 图像传感器的性能起到了非常重要的评估，信噪比反映了图像的质量的好坏，图像传感器的信噪比越大则图像的噪点越少图像的质量越高，信噪比定义为有效平均灰度值与噪声的比值即光场下的平均灰度值减去暗场下的平均灰度值与标准差的比值即：

$$SNR = \frac{\mu_y - \mu_{y.dark}}{\sigma_y} \quad (1)$$

$$SNR(\mu_p) = \frac{\eta\mu_p}{\sqrt{\sigma_d^2+\sigma_q^2/K^2+\eta\mu_p}} \quad (2)$$

如下（图 9）所示为 CMV4000 在辐照前以及辐照后信噪比参数变化，在能量为 208MeV 注量为 1×10^7ions/cm² 的重粒子辐照下信噪比明显下降。退火时间在 64 天前信噪比并没有明显的变化随后有明显升高的趋势，在第 84 天以及第 87 天测得的信噪比变化有了明显的变缓。其中满阱容量的大小直接影响了信噪比、动态范围及灵敏度等与像素有关的参数。

从（图 9）中可以看出满阱容量在辐照前以及随退火时间的变化关系，经过高能重离子辐照后满阱容量参数下降趋势比较明显，在退火的第 64 天后满阱容量参数上升趋势比较明显。根据 EMVA1288 的标准满阱容量可以定义为饱和灰度值与转换增益的比值即（$\frac{\mu_{y.sat}}{K}$）[8-9]。当 CMOS 图像传感器在重离子辐照下产生氧化物陷阱及界面陷阱电荷，在其 PPD（钳位二极管）中产生界面陷阱电荷以及在其耗尽区外产生体缺陷，这些缺陷是导致满阱容量参数下降的主要因素。满阱容量决定了所容纳的最大电子数，满阱容量的辐照后参数退化趋势如（图 10）所示，其中量子效率可以表征为入射在像元的光子并转化为一定电荷量的（μ_e）的电子与入射在像元的光子数（μ_p）的比值即：$\eta(\lambda) = \frac{\mu_e}{\mu_p}$，当量子效率减小时由公式②可知光响应非均匀性也随之减小，导致信噪比也随之减小。

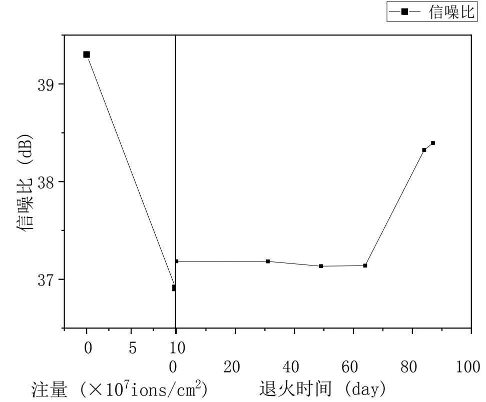


图 9　信噪比

Fig.9 SIGNAL-NOISE RATIO

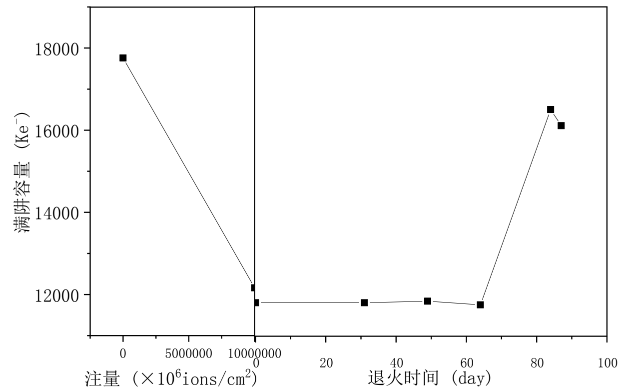


图 10　满阱容量

Fig.10 Full Well capacity

动态范围反应了图像传感器芯片可探测的信号范围，动态范围越大表示 CMOS 可记录更大的光场以及暗场下的信号，动态范围也是表征 CMOS 图像传感器性能的一个重要的参数。根据 EMVA1288 的定义可知动态范围可以是由饱和信号（$\mu_{p.sat}$）以及绝对灵敏度阈值（$\mu_{p.min}$）的反比表征即[10-11]：$DR = \frac{\mu_{p.sat}}{\mu_{p.min}}$。CMOS 图像传感器经过重离子辐照后图像传感器的动

态范围下降，在退火时间在 31 到 61 天之间动态范围总体是一个先下降后上升的趋势但是上升以及下降并不明显，在第 64 天动态范围有一个明显的上升并在后续几天达到平衡如下（图 11）所示。其中绝对灵敏度阈值表示了像元收集的最小光子数可以表示为[11-12]：

$$\mu_p(SNR=1)=\mu_{p.min}\approx\frac{1}{\eta}\left(\sqrt{\sigma_d^2+\sigma_q^2/K^2}+\frac{1}{2}\right)=\frac{1}{\eta}\left(\frac{\sigma_{y.dark}}{K}+\frac{1}{2}\right)\quad(3)$$

其中当量子效率减小，转换增益增大导致绝对灵敏度阈值也随之增大，其中 CMOS 图像传感器在辐照后的饱和灰度值并没有发现明显的增大，由动态范围的表征关系可以得出其参数也会随之下降。

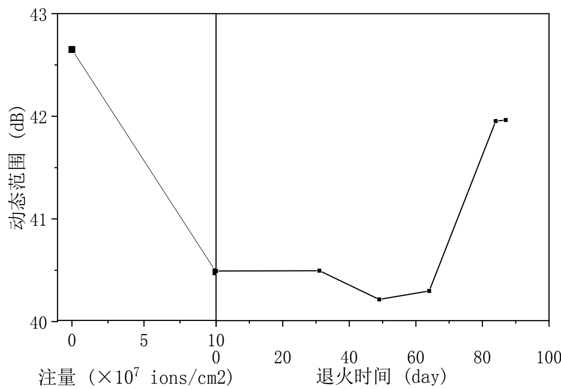


图 11　动态范围

Fig.11 Dynamic range

光响应非均一性（PRNU）表示各像素单元的灵敏度不同，通常在光照条件下 FPN 噪声用光响应非均匀性来评估。（如图）所示，经过辐照后光响应非均一性明显增大，通过长时间室温退火后 PRNU 接近到辐照前的水平。可以推测出 PRNU 主要受到辐照后形成的氧化物陷阱电荷的影响。另外 CMOS 图像传感器在光照条件下主要是通过吸收光子，然后将吸收的光子转化为电子并储存下来转化为一定幅值的电压信号，其中满阱容量降低主要是由于辐照后在空间电荷区形成的氧化物陷阱电荷，满阱容量的降低同时也会影响到电荷的储 CMOS 图像传感器的灵敏度[12-13]，由于 CMOS 图像传感器中各像素的工艺存在差异，辐照后也会使各像素灵敏度差异加大。CMOS 图像传感器的 CDS（相关双采样）电路对 PRNU 也有一定的贡献，推测辐照后 CDS 电路中各个晶体管参数退化所引起的参数不一致性也会增加。

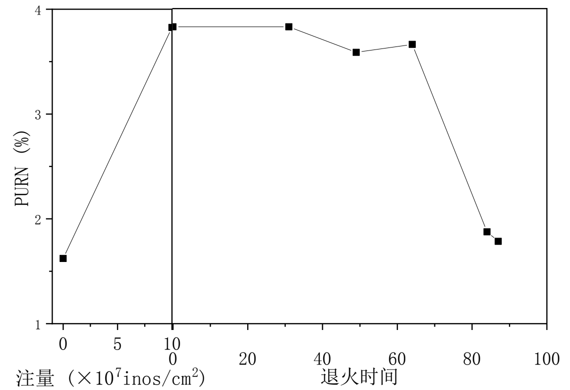


图 12 PRNU

Fig.12 PRNU

3.3　光谱响应

如下（图 13）所示为辐照前后的光谱响应图，光谱响应的测试范围为 400μm-1100μm，在 400μm-1100μm 期间每 30μm 取一个点，总共取点数为 24 个，光的波长在 460μm 时达到了峰值。光谱响应反应了在不同波长λ的情况下对入射光的影响情况。如下图可以看到在辐照后的光谱响应有略微的下降但是退化情况并不明显，CMOS 图传感器主要是由于在一定的曝光时间内入射到像元上的光子，然后将这些光子转化为电子，其主要是通过扩散等方式进入空间电荷区。由于衬底中的载流子浓的小于杂质的浓度，重离子位移损伤缺陷就可以表示为有效的复合中心[13-14]，其中电子速率有下列两个公式表示即：

$$S_n=\sigma_n(N_T+N_{DD})V_t\quad(4)$$

$$N_t、N_{DD}\propto DDD\quad(5)$$

其中，σ_n 为俘获截面，V_t 表示电子热运动速率，Nt 为单一缺陷能级体缺陷的密度，NDD 表示体缺陷密度，其中扩散长度 Ln 与载流子寿命之间的关系如下式所示

$$\tau_n = \frac{1}{S_n} \tag{6}$$

$$L_n = \sqrt{D\tau_n} = \sqrt{\frac{D}{S_n}} = \sqrt{\frac{D}{\sigma_n (N_T + N_{DD}) V_t}} \tag{7}$$

可以看出当电子速率与俘获截面，团簇缺陷密度，单一能级体缺陷的密度成以及电子热运动速率正比。由载流子寿命以及扩散长度公式可知电子速率越高载流子的寿命及扩散长度越小，所以当重离子辐照时其缺陷密度增加导致电子速度也随之增加，载流子寿命以及扩散长度也将随之减小，当扩散长度减小时耗尽区光生电子的收集效率也会减小从而导致光谱响应的退化[14-15]。

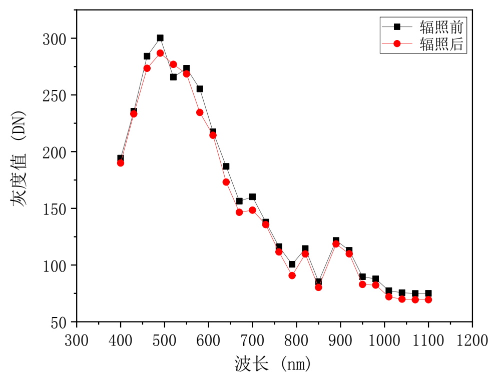


图 13 光谱响应

Fig. 13 Spectral response

3 结论

总体来看国内外对 CMOS 图像传感器重离子永久损伤效应研究不足，在重离子辐照后对 CMOS 图像传感器各项参数的参数退化情况和对各项参数退化机理研究尚不完善。本文主要通过在重离子辐射环境下及室温退火对 CMOS 图像传感的永久损伤效应的研究，并通过分析辐照前后 CMOS 图像传感器的各项参数退化情况以及规律的物理机理，主要是由于位移损伤以及电离损伤所导致的一系列参数的退化，其中由位移损伤所产生的缺陷主要集中在空间电荷区，能量较高的重离子产生的缺陷主要是以团簇缺陷为主。其中电离产生的缺陷主要分布在 $Si\text{-}SiO_2$ 的界面区以及 PPD 耗尽区附近 STI 结构的表面产生的暗电流，位移损伤导致的缺陷主要分布在空间电荷区。

本文对 CMV4000 进行重离子辐照试验，其中对暗电流、满阱容量、光谱响应、信噪比、动态范围、FPN 噪声进行了辐照前后的对比，各项参数在辐照后均有了一定程度的下降，其中光谱响应下降的程度并不明显主要原因是光谱响应对位移损伤并不敏感。

以上内容对重离子的永久损伤机理进行了一个初步的分析，后续还需要进一步完善，不同的注量以及注量率，不同的能量产生的损伤机理还有待探究。

致谢

本文章的辐照实验的到了中国科学院新疆理化技术研究所和中国原子能研究院的大力支持，特此致谢

参考文献:

[1] Virmontois C , Goiffon V , Magnan P , et al. Influence of displacement damage dose on dark current distributions of irradiated CMOS image sensors[J]. 2011.

[2] Benton E R, Benton E V. Space radiation dosimetry in low-Earth orbit and beyond [J]. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms, 2001, 184(1): 255−294.

[3] Le Roch A, Virmontois C, Paillet P, et al. Comparison of X-Ray and Electron Radiation Effects on Dark Current Non-Uniformity and Fluctuations in CMOS Image Sensors [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2019, 67(1): 268-277.

[4] 周彦平, 谢小龙, 刘洋, et al. CMOS 图像传感器电子辐照实验的研究 [J]. 红外与激光

工程, 2016, 45(5): 103-107.

[5] Goiffon V, Magnan P, Martin-Gonthier P, et al. Evidence of a Novel Source of Random Telegraph Signal in CMOS Image Sensors [J]. IEEE Electron Device Letters, 2011, 32(6): 773-775

.

[6] Belloir J M , Goiffon V , Virmontois C , et al. Dark Current Spectroscopy on Alpha Irradiated Pinned Photodiode CMOS Image Sensors[J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2016, 63(4):1-10.

[7] 汪波, 李豫东, 郭旗, et al. 质子辐射下互补金属氧化物半导体有源像素传感器暗信号退化机理研究 [J]. 物理学报, 2015, 64(8): 193-199.

[8] 马 林 东 , 李 豫 东 , 文 林 , et al. Total ionizing dose effects in pinned photodiode complementary metal-oxide-semiconductor transistor active pixel sensor [J]. Chinese Physics B, 2018, 27(10): 356-360.

[9] Kuroda R, Yonezawa A, Teramoto A, et al. A Statistical Evaluation of Random Telegraph Noise of In-Pixel Source Follower Equivalent Surface and Buried Channel Transistors [J]. IEEE Transactions on Electron Devices, 2013, 60(10): 3555-3561.

[10] Bogaerts J, Dierickx B, Mertens R. Random telegraph signals in a radiation-hardened CMOS active pixel sensor [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2002, 49(1): 249-257.

[11] Vankemmel R, Schoenmaker W, Demeyer K. A unified wide temperature range model for the energy gap, the effective carrier mass and intrinsic concentration in silicon [J]. Solid-state Electronics, 1993, 36(10): 1379-1384.

[12] Virmontois C, Goiffon V, Magnan P, et al. Displacement damage effects due to neutron and proton irradiations on CMOS image sensors manufactured in deep submicron technology [J]. IEEE Transactions on Nuclear Science, 2010, 57(6): 3101−3108

[13] Wen L, Li Y D, Guo Q, Ren D Y, Wang B and Ma L Y. 2015. Analysis of ionizing and department damage mechanism in proton-irradiation-induced scientific charge-coupled device. Acta Physica Sinica, 64(2): 024220 (文林, 李豫东, 郭旗, 任迪远, 汪波, 玛丽娅. 2015. 质子辐照导致科学级电荷耦合器件电离效应和位移效应 分析. 物 理 学 报 , 64(2): 024220) [DOI: 10.7498/aps.64.024220]

[14] Noble P. Self-Scanned Silicon Image Detector Arrays [J]. Electron Devices, IEEE Transactions on, 1968, 15(4): 202-209.

[15] Scott A, Hackett J and Man K. 2013. On-orbit results for canada’s sapphire optical payload//Proceedings of Advanced Maui Optical and Space Surveillance Technologies Conference. Wailea, Maui: AMOS